

NRTW 2026

National Reliability Technology Workshop

Mercredi 1^{er} & jeudi 2 avril 2026 | Grenoble

Comportement hygrosopique du gel silicone utilisé pour l'encapsulation des modules électronique de puissance

Encadrement de thèse:

Pascal RAIN : Directeur de thèse (G2Elab)

Rachelle HANNA : Encadrante (G2Elab)

Loïc THEOLIER : Co-directeur (IMS)

Régis MEURET : Encadrant (IRT Saint Exupéry)



Organisé par :



Doctorant: Fidèle NIYIBIZI

Financé par :





I. Le projet SiCRET+

II. Module électronique de puissance

III. Etat de l'art

- **Effets de l'humidité sur les modules électronique de puissances**
- **Absorption de l'humidité par le gel silicone**

IV. Résultats expérimentaux sur le comportement hygroscopique du gel silicone:

- **Par la méthode de mesure gravimétrique**
- **Par la méthode de mesure via des capteurs de température et d'humidité intégrés**

V. Conclusion & Perspectives



I. Le projet SiCRET+

II. Module électronique de puissance

III. Etat de l'art

- **Effets de l'humidité sur les modules électronique de puissances**
- **Absorption de l'humidité par le gel silicone**

IV. Résultats expérimentaux sur le comportement hygroscopique du gel silicone:

- **Par la méthode de mesure gravimétrique**
- **Par la méthode de mesure via des capteurs de température et d'humidité intégrés**

V. Conclusion & Perspectives

SiCRET+

SiC(MOSFET) Reliability Evaluation for Transport

◆ Dans le cadre du projet France 2030
Piloté par l'IRT Saint Exupéry et SuperGrid Institute

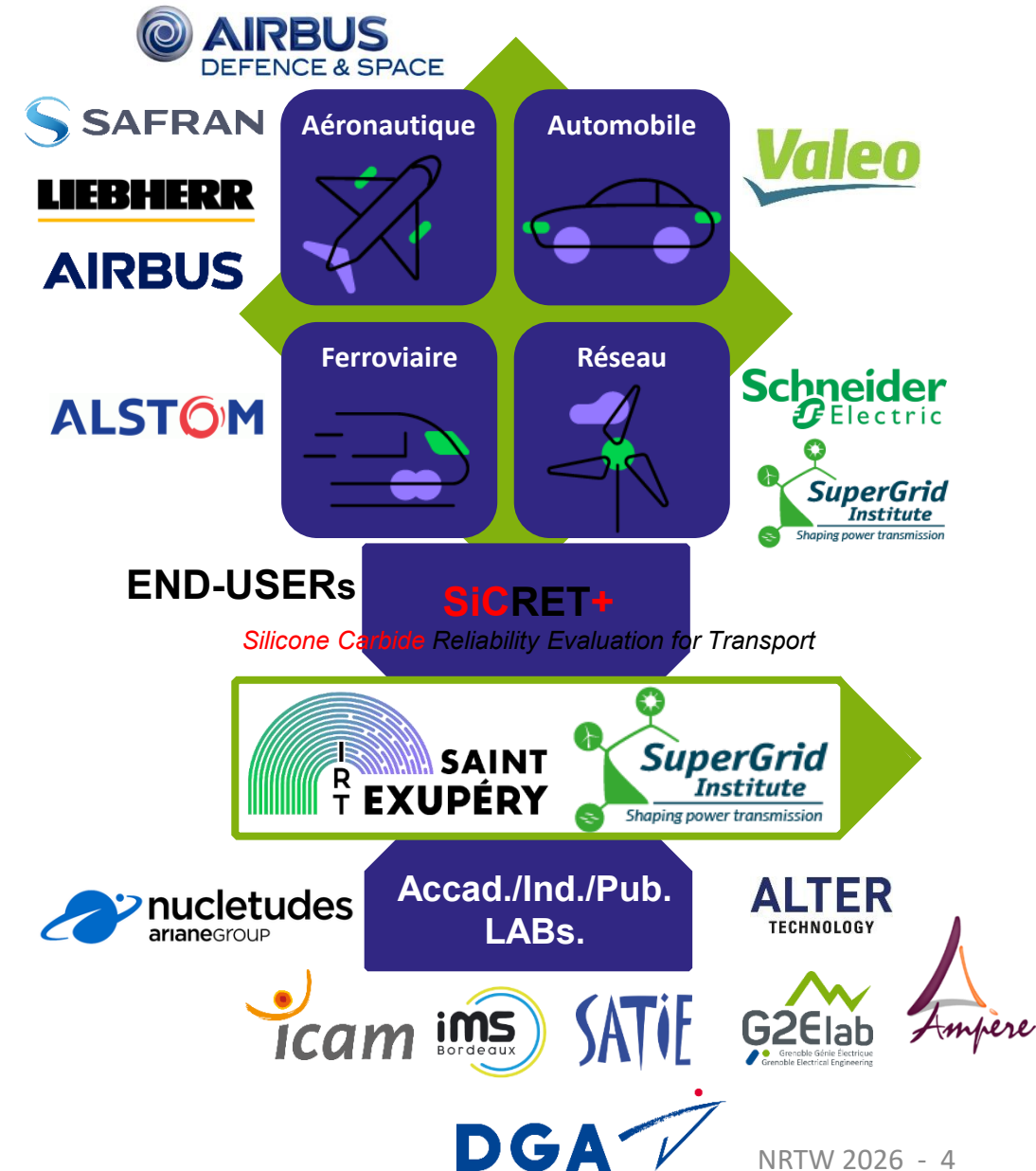
◆ De SiCRET à SiCRET+

SiCRET (2020–2023)

- Première initiative à l'échelle nationale dédiée à la fiabilité MOSFET SiC
- Méthodologies innovantes de test
- Collaboration avec STMicroelectronics, Mitsubishi, Infineon, Rohm, Wolfspeed

SiCRET+ : Au-delà de la puce

- Comprendre le vieillissement des modules de puissance SiC en environnement sévère
- Maîtriser la mise en parallèle des puces
- Développer des modèles prédictifs





I. Le projet SiCRET+

II. Module électronique de puissance

III. Etat de l'art

- Effets de l'humidité sur les modules électronique de puissances
- Absorption de l'humidité par le gel silicone

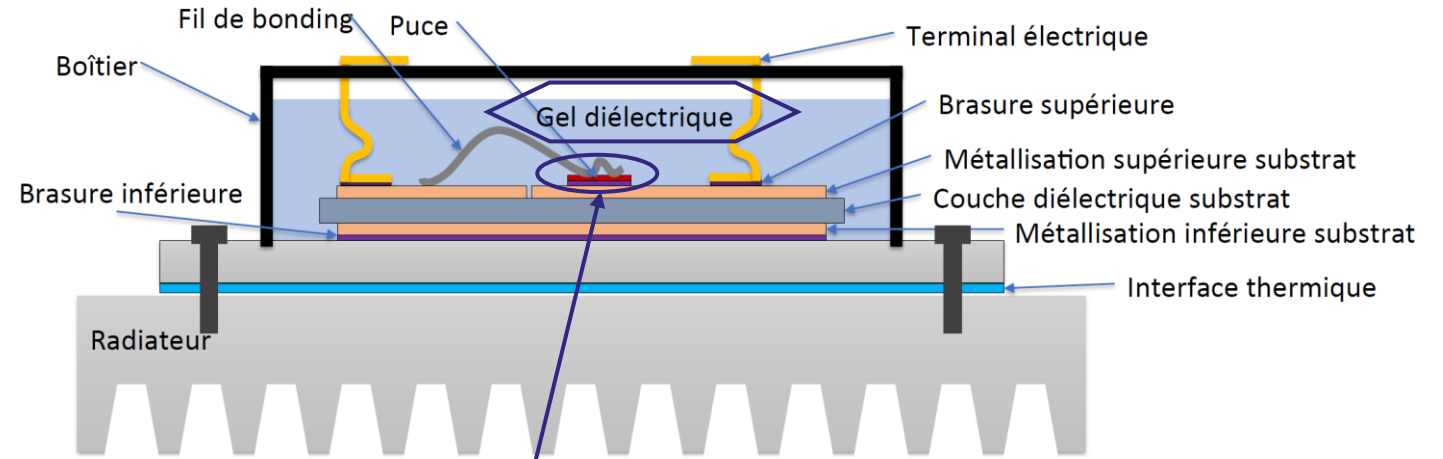
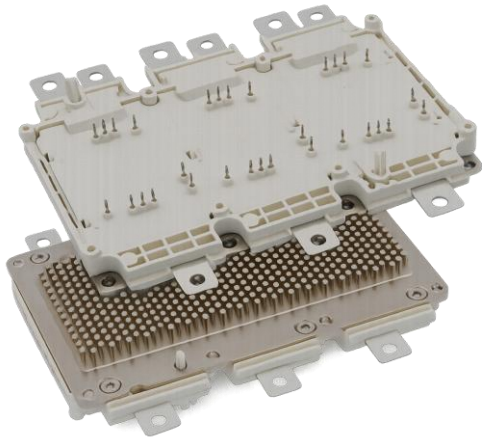
IV. Résultats expérimentaux sur le comportement hygroscopique du gel silicone:

- Par la méthode de mesure gravimétrique
- Par la méthode de mesure via des capteurs de température et d'humidité intégrés

V. Conclusion & Perspectives



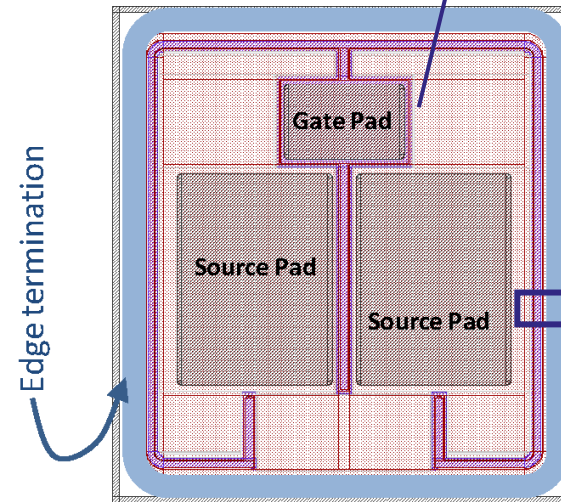
Module ACEPACK DRIVE



Encapsulation

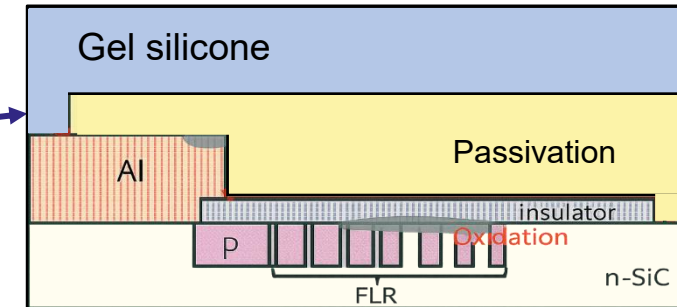
↳ Rôle:

- Isolation électrique
- Protection contre l'environnement externe
- Support mécanique
- Barrière chimique (limite l'exposition aux agents chimiques, poussière, etc.)



MOSFET SiC

Terminaison de bord





I. Le projet SiCRET+

II. Module électronique de puissance

III. Etat de l'art

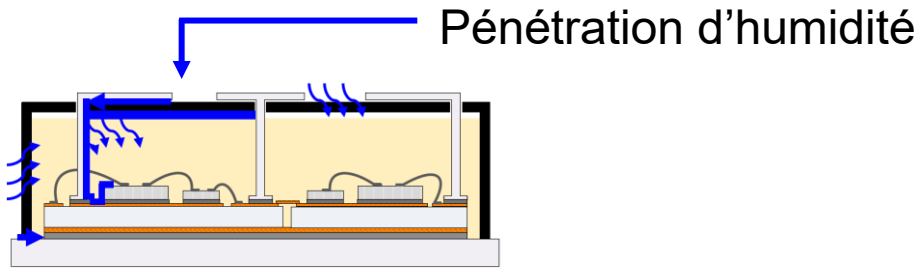
- **Effets de l'humidité sur les modules électronique de puissances**
- **Absorption de l'humidité par le gel silicone**

IV. Résultats expérimentaux sur le comportement hygroscopique du gel silicone:

- **Par la méthode de mesure gravimétrique**
- **Par la méthode de mesure via des capteurs de température et d'humidité intégrés**

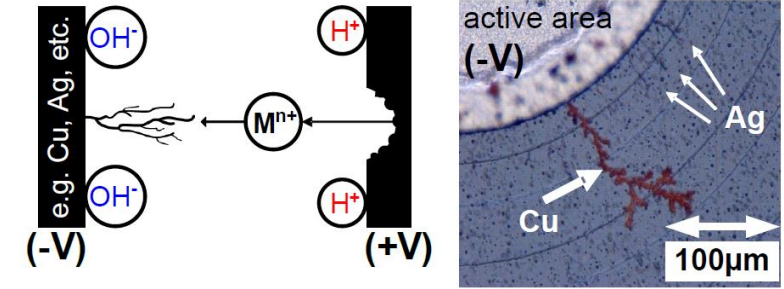
V. Conclusion & Perspectives

Effets de l'humidité sur les modules électronique de puissances



1. Migration électrochimique (MEC)

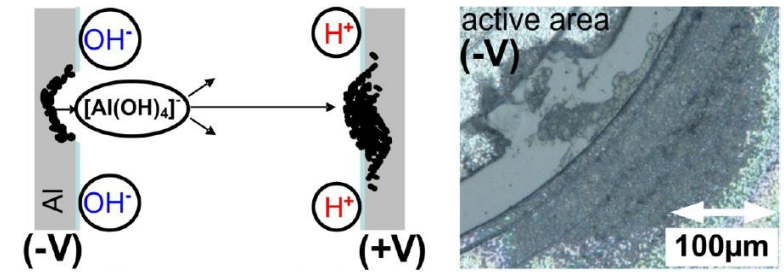
- Dissolution de l'anode
- Migration des ions
- Précipitation à la cathode, éventuellement sous forme de dendrites



1

2. Corrosion et défaillance de l'aluminium

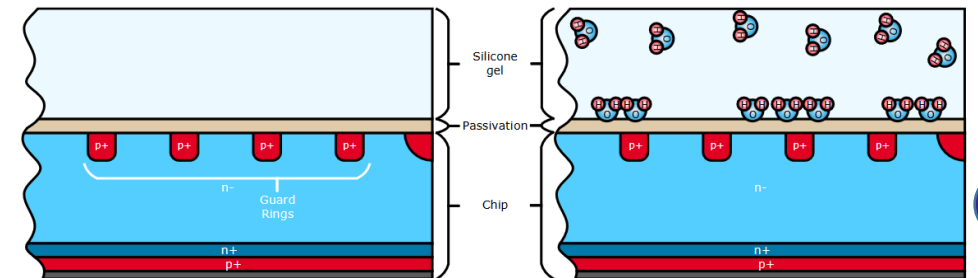
- Dissolution de la cathode
- Transport des aluminates dans l'électrolyte
- Précipitation à l'anode



2

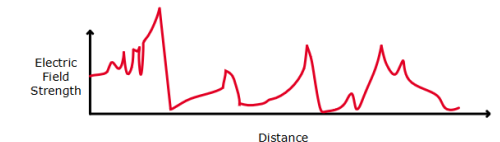
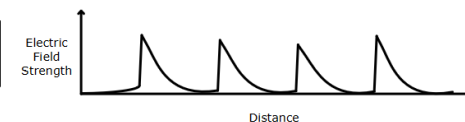
3. Charges de surface

- Distorsion du champ électrique et augmentation des courants de fuites

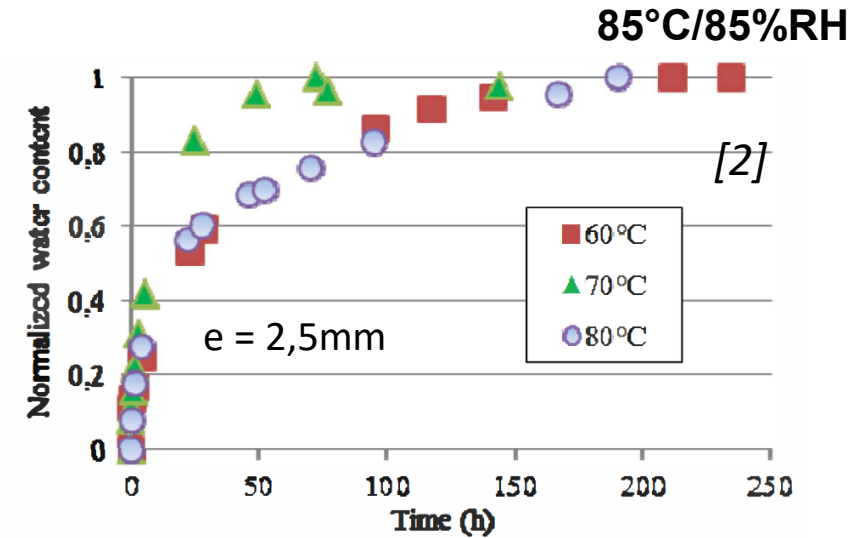
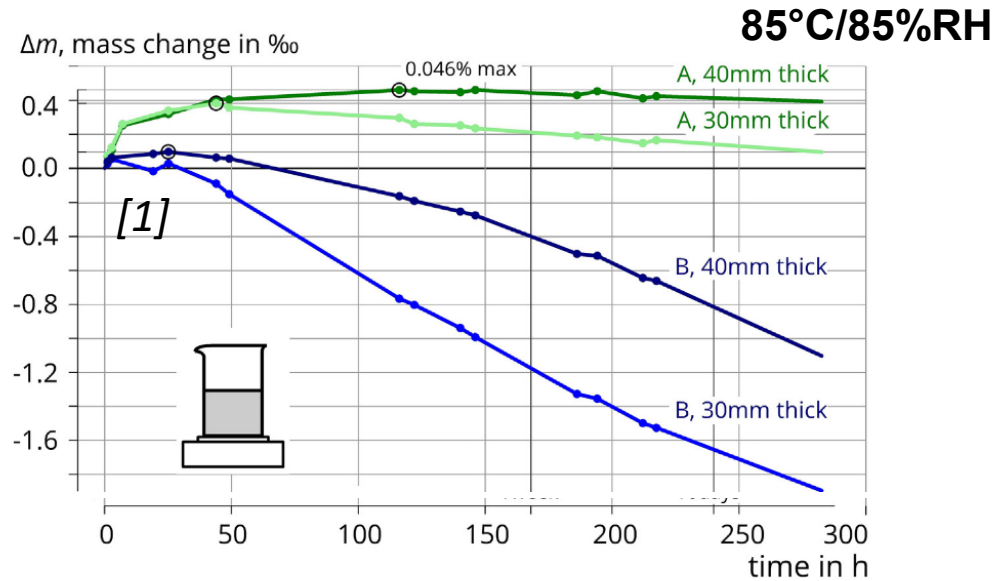


3

Le champ électrique a un effet très important sur ces modes de défaillances



Absorption de l'humidité par le gel silicone : Méthode gravimétrique

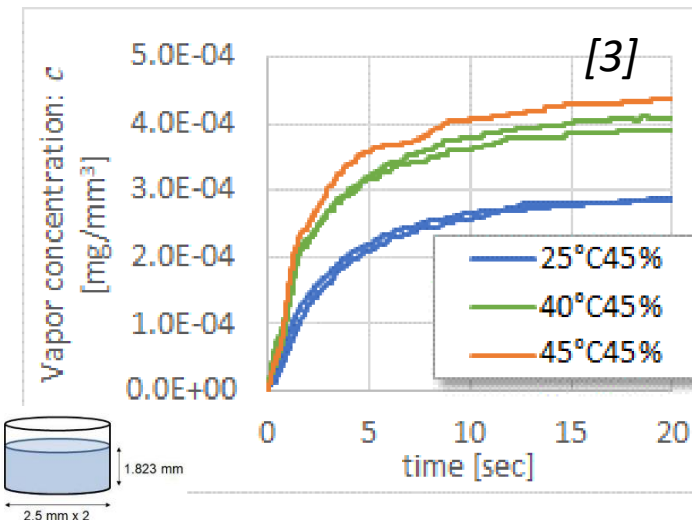


Seconde équation de Fick

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \longrightarrow \quad \frac{m(t) - m_0}{m_{eq} - m_0} = \left(\frac{4D}{\pi L^2} \right)^{\frac{1}{2}} t^{\frac{1}{2}}$$

$$D = 1,39 \cdot 10^{-9} \text{ [m}^2/\text{s]}$$

- Prise de masse pour certains types de gels?
- Perte de masse pour d'autres types de gels?



| 45%RH | D(m ² /s) |
|-------|----------------------|
| 25°C | 9.19E-9 |
| 40°C | 1.44E-8 |
| 45°C | 1.48E-8 |

[1]: Zhang et al. - 2020 - Study of moisture transport in silicone gel for IGBT modules

[2]: Lesaint et al. - 2014 - Absorption of water in silicon gel. [3]: Hatori et al. - 2021 - Humidity Absorption Behavior of Silicone Gel in HVIGBT Modules

Absorption de l'humidité par le gel silicone : Méthode par capteurs

Seconde équation de Fick

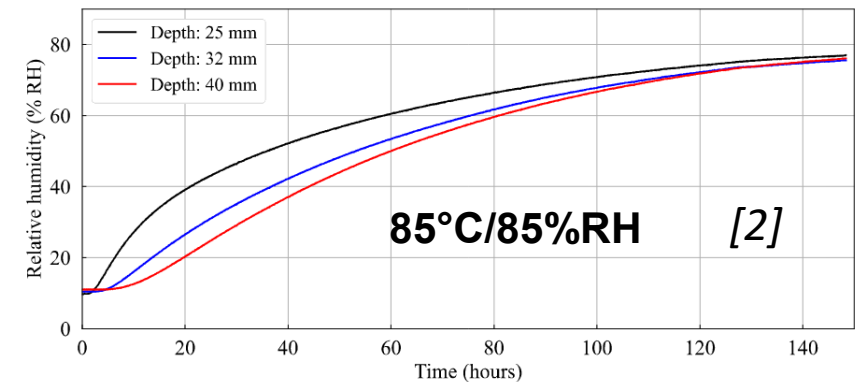
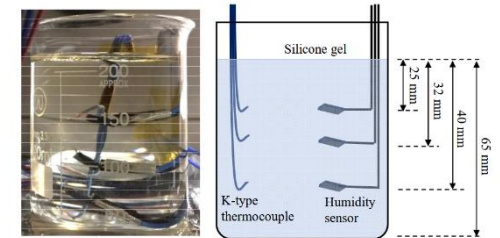
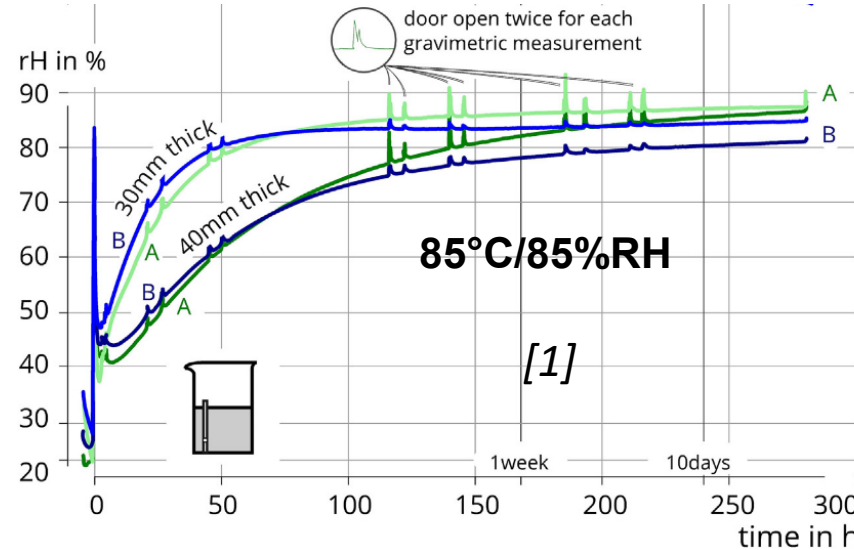
$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$



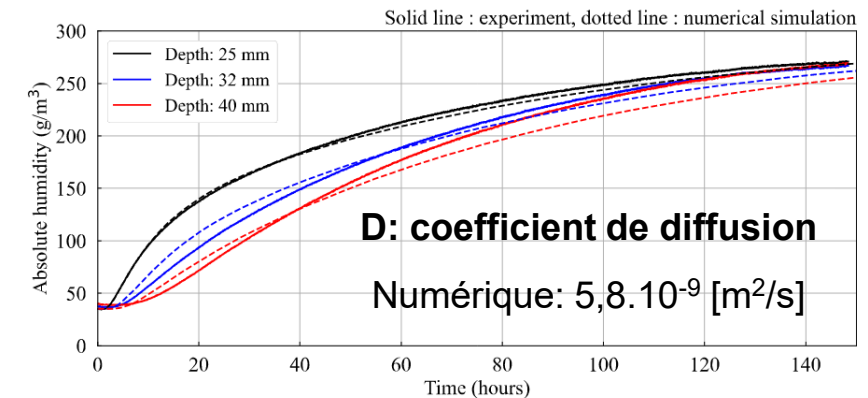
$$\frac{m(t) - m_0}{m_{eq} - m_0} = \frac{rH(t) - rH_0}{rH_{eq} - rH_0} = \left(\frac{4D}{\pi L^2}\right)^{\frac{1}{2}} t^{\frac{1}{2}}$$

D: coefficient de diffusion

Entre 1 et $2 \cdot 10^{-9}$ [m²/s]



La méthode gravimétrique donne des résultats cohérents avec ceux obtenus par la méthode reposant sur l'utilisation des capteurs d'humidité et de température



[1]: Zhang et al. - 2020 - Study of moisture transport in silicone gel for IGBT modules

[2]: Umemoto et al. - 2024 - Moisture Absorption Analysis in Silicone Gel for Power Modules: Experiments and Modeling



I. Le projet SiCRET+

II. Module électronique de puissance

III. Etat de l'art

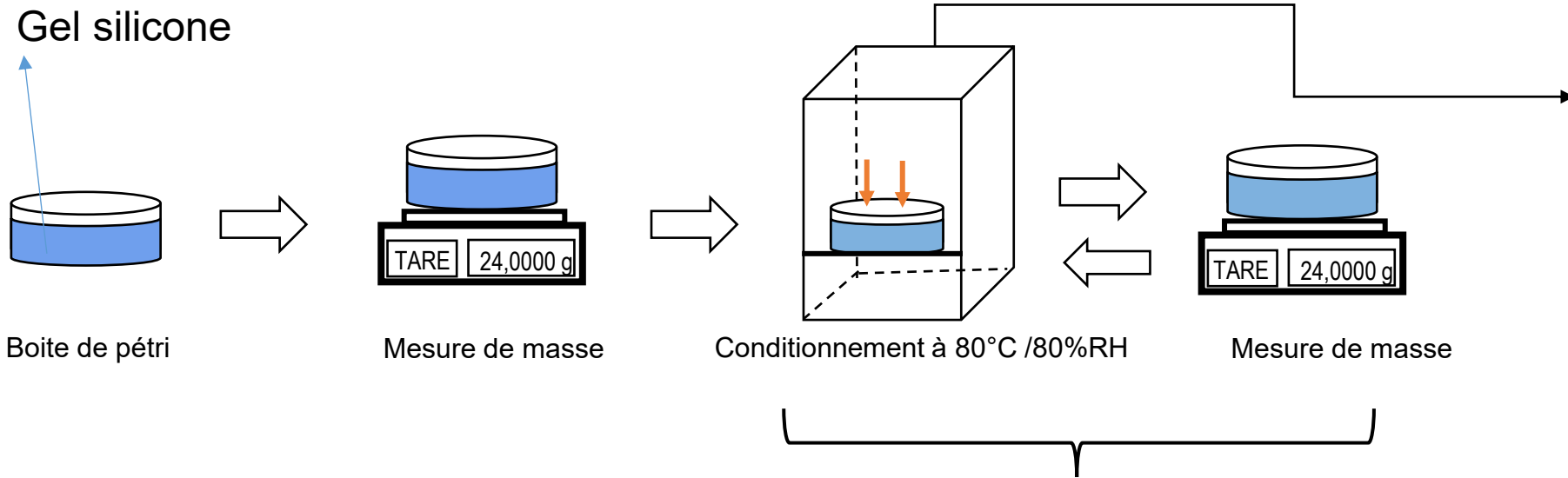
- Effets de l'humidité sur les modules électronique de puissances
- Absorption de l'humidité par le gel silicone

IV. Résultats expérimentaux sur le comportement hygroscopique du gel silicone:

- **Par la méthode de mesure gravimétrique**
- **Par la méthode de mesure via des capteurs de température et d'humidité intégrés**

V. Conclusion & Perspectives

Méthode de mesure gravimétrique

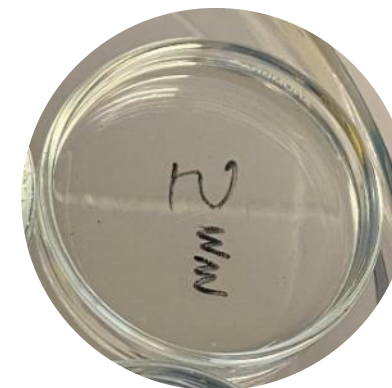
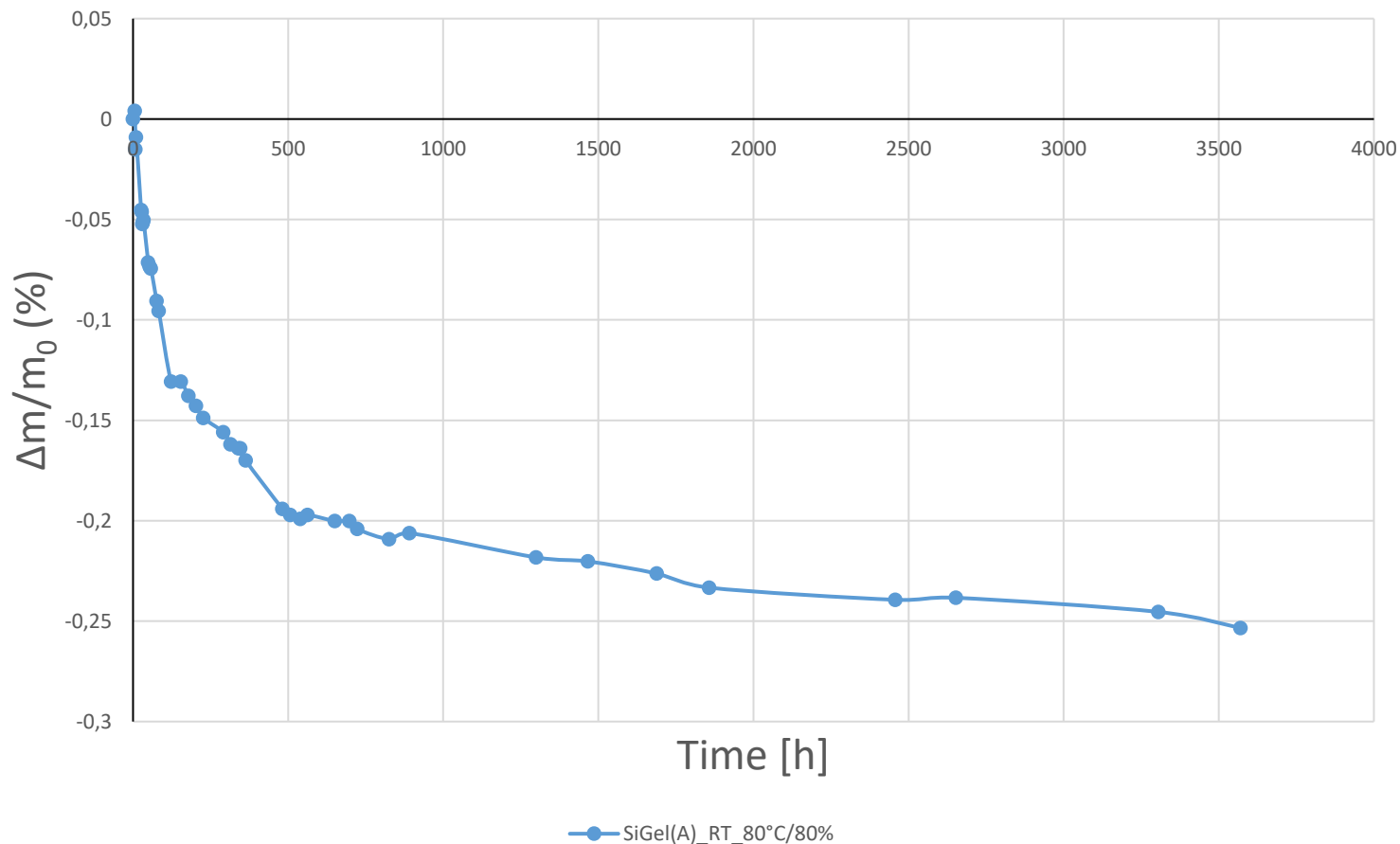


Enceinte climatique

Les échantillons sont conditionnés à 80 °C et à 80 % d'humidité relative, leur masse étant contrôlée toutes les deux heures le premier jour, puis quotidiennement, et enfin une fois par semaine.

Méthode de mesure gravimétrique

80°C/80%RH



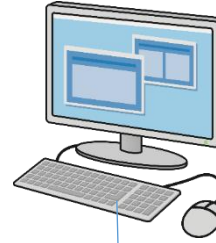
Le gel perd de la masse avec la pénétration de l'humidité

→ Mécanismes sous-jacents?



Méthode de mesure via des capteurs de température et d'humidité intégrés

Capteur Sensirion SHT45



Carte Arduino

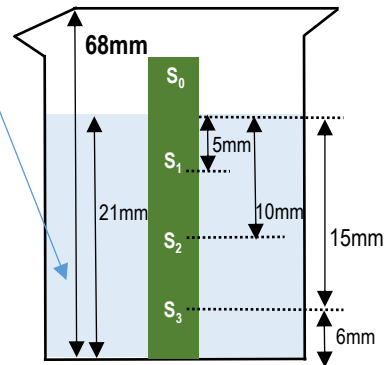
Banc de mesure



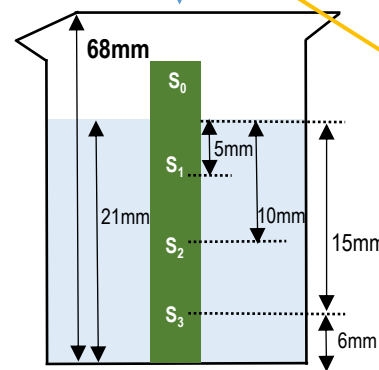
Precision SHT45: $\pm 1\%$ RH / $\pm 0,1^\circ\text{C}$

Silicone gel

S_0, S_1, S_2 et S_3 :
Capteurs Sensirions
(SHT45-AD1B)



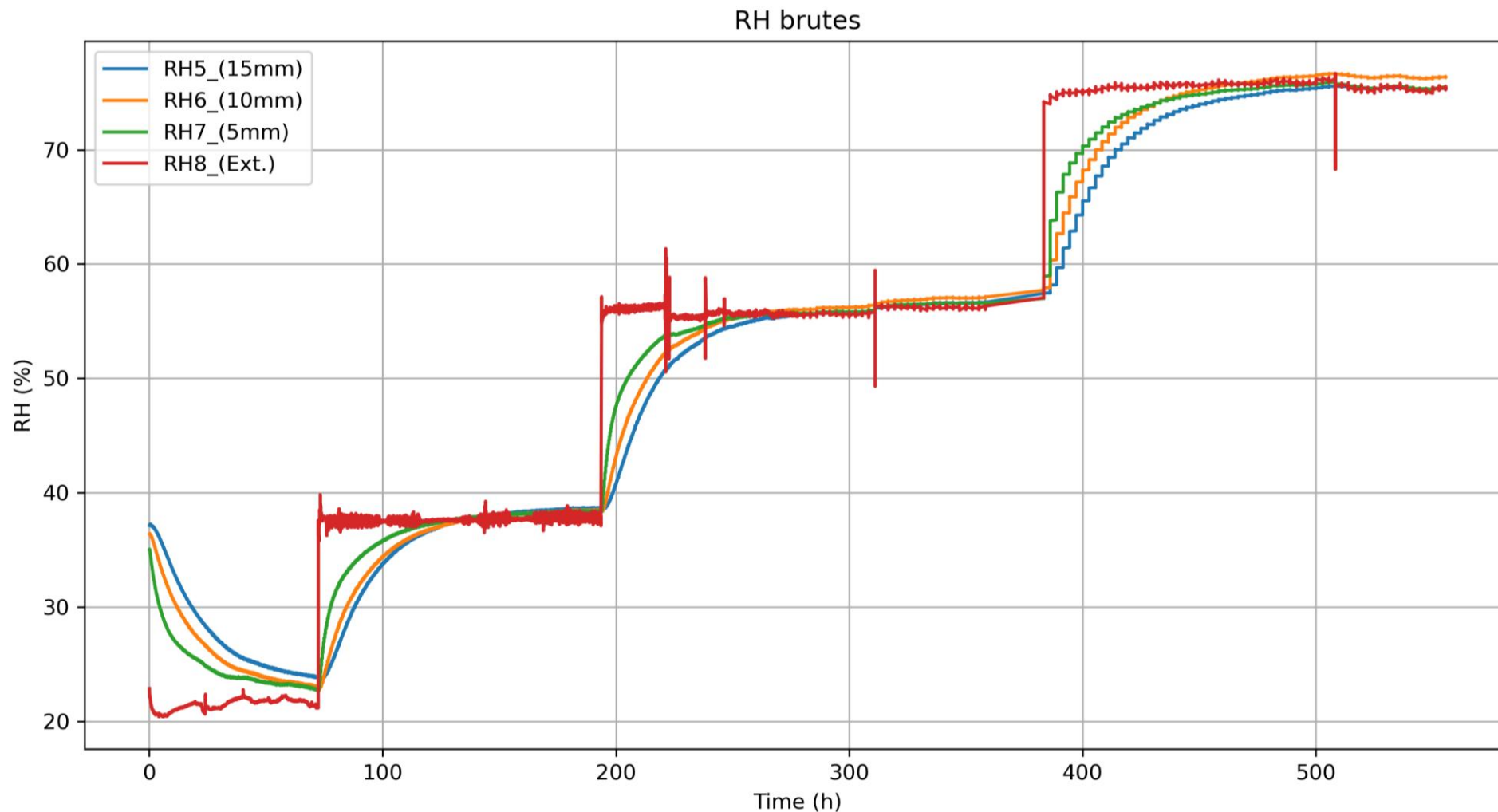
Becher





Méthode de mesure via des capteurs de température et d'humidité intégrés

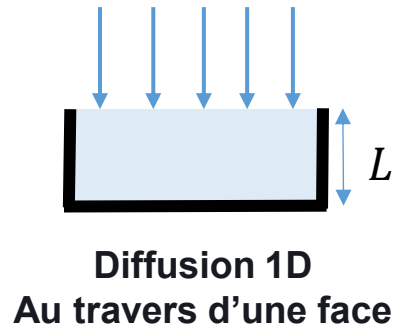
Step
RH à:
20°C



Méthode de mesure via des capteurs de température et d'humidité intégrés

Equation de Fick:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$



Solution exacte pour une plaque finie est :

$$\theta(x, t) = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin\left(\frac{(2n+1)\pi x}{2L}\right) \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D t}{4L^2}\right)$$

$$L = 21\text{mm}$$

$$\theta = \frac{RH(x, t) - RH_0}{RH_s - RH_0} \quad C \propto RH \text{ d'après la loi d'Henry} \quad C = S \times p_{H_2O} = S \times p_{H_2O_{sat}} \times \frac{RH}{100}$$

Conditions :

- A $t = 0$: Gel silicone uniforme à RH_0
- A $t > 0$: $RH(x, t)$
- A saturation : RH_s

D : Coefficient de diffusion d'humidité

S : Coefficient de solubilité

p_{H_2O} : Pression partielle de vapeur d'eau (Pa)

$p_{H_2O_{sat}}$: Pression de vapeur saturante (Pa)

RH : Humidité relative (%)

Méthode de mesure via des capteurs de température et d'humidité intégrés

Optimisation non linéaire par moindres carrés

Données expérimentales : $\theta_{exp}(t_i)$

Définition model : $\theta_{model}(t_i, D)$

$$\min_D \sum_i [\theta_{exp}(t_i) - \theta_{model}(t_i, D)]^2$$

$$\min_D \left\| \theta_{exp}(t) - \left[1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{200} \frac{1}{2n+1} \sin\left(\frac{(2n+1)\pi x}{2L}\right) \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D t}{4L^2}\right) \right] \right\|^2$$

Le coefficient de diffusion est obtenu par minimisation non linéaire des moindres carrés.

L'algorithme utilisé est Levenberg–Marquardt, qui combine méthode de Gauss-Newton et descente de gradient.

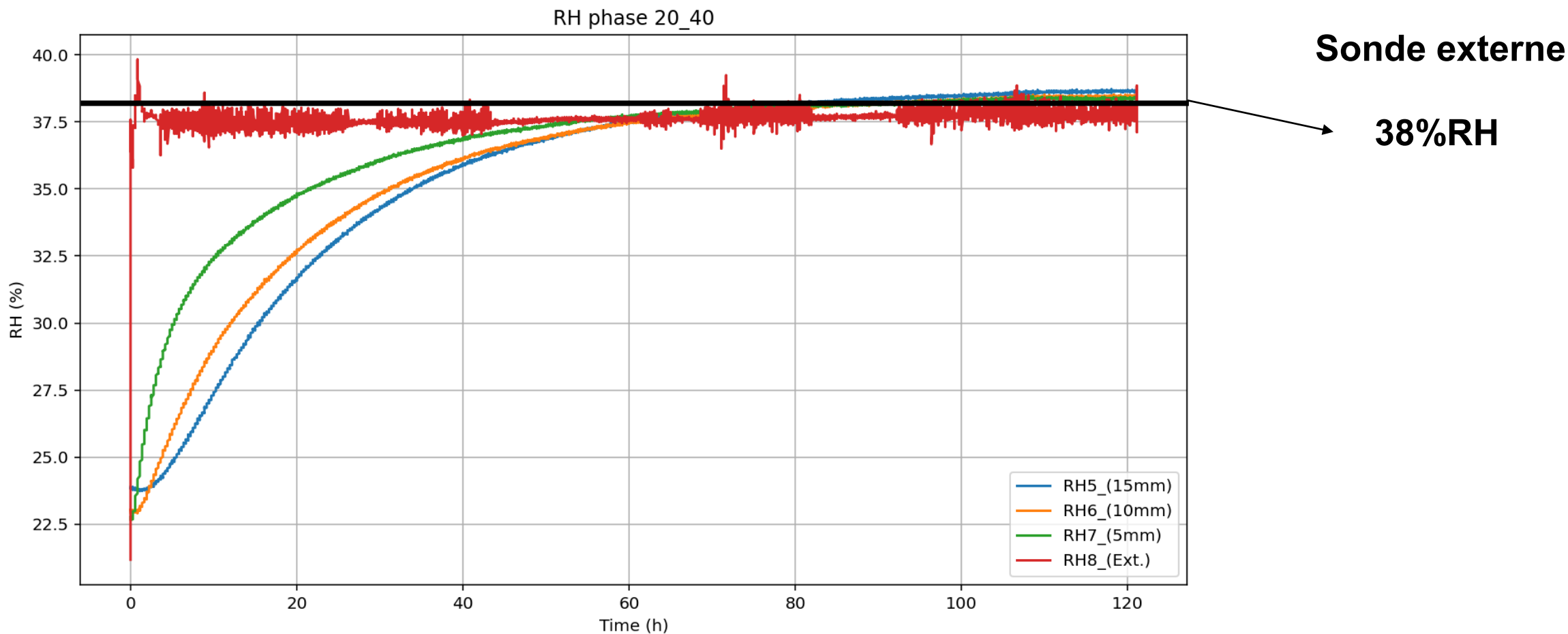
Il ajuste itérativement le paramètre D pour minimiser l'erreur quadratique entre modèle plaque finie et données expérimentales.



Méthode de mesure via des capteurs de température et d'humidité intégrés

Absorption 20% - 40%RH

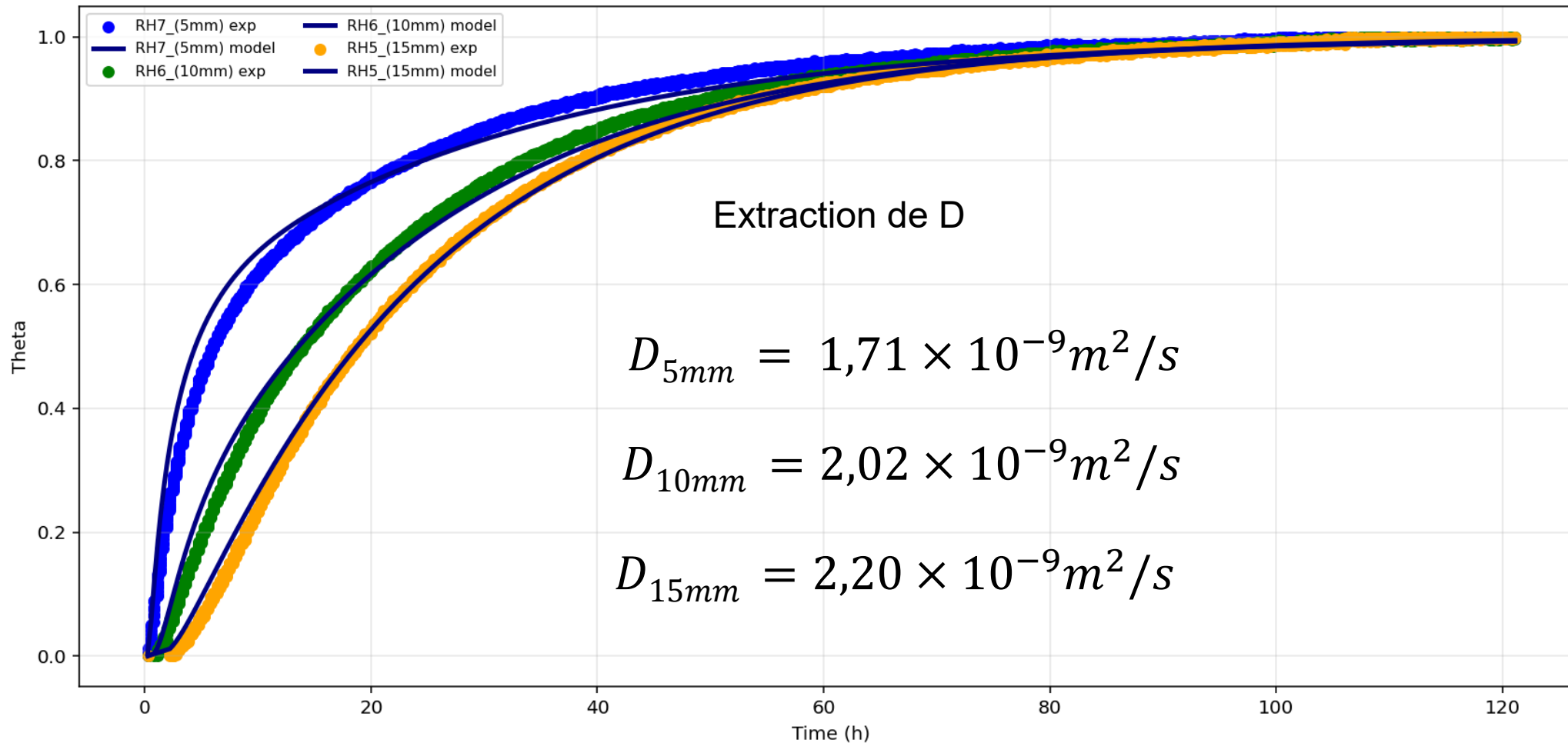
20°C





Méthode de mesure via des capteurs de température et d'humidité intégrés

Absorption 20% - 40%RH

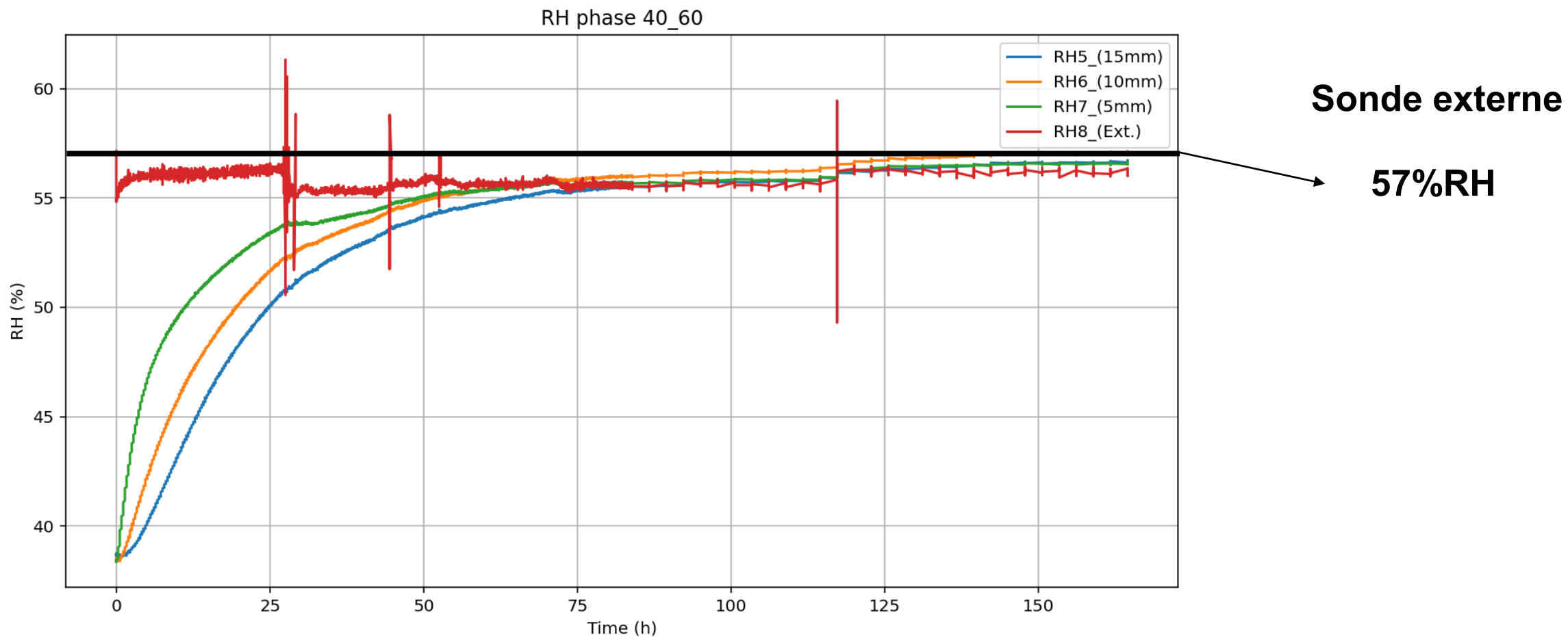




Méthode de mesure via des capteurs de température et d'humidité intégrés

Absorption 40% - 60%RH

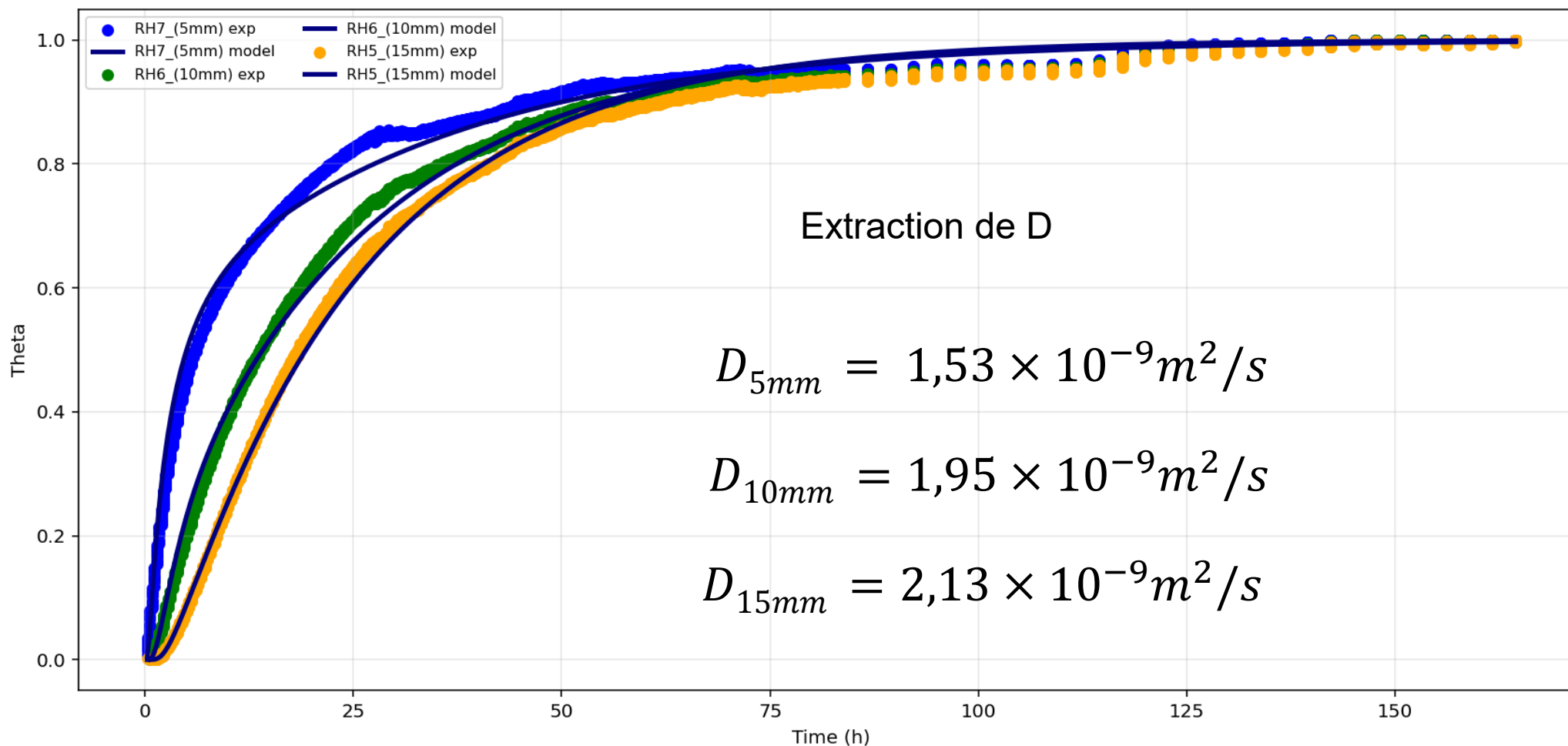
20°C





Méthode de mesure via des capteurs de température et d'humidité intégrés

Absorption 40% - 60%RH



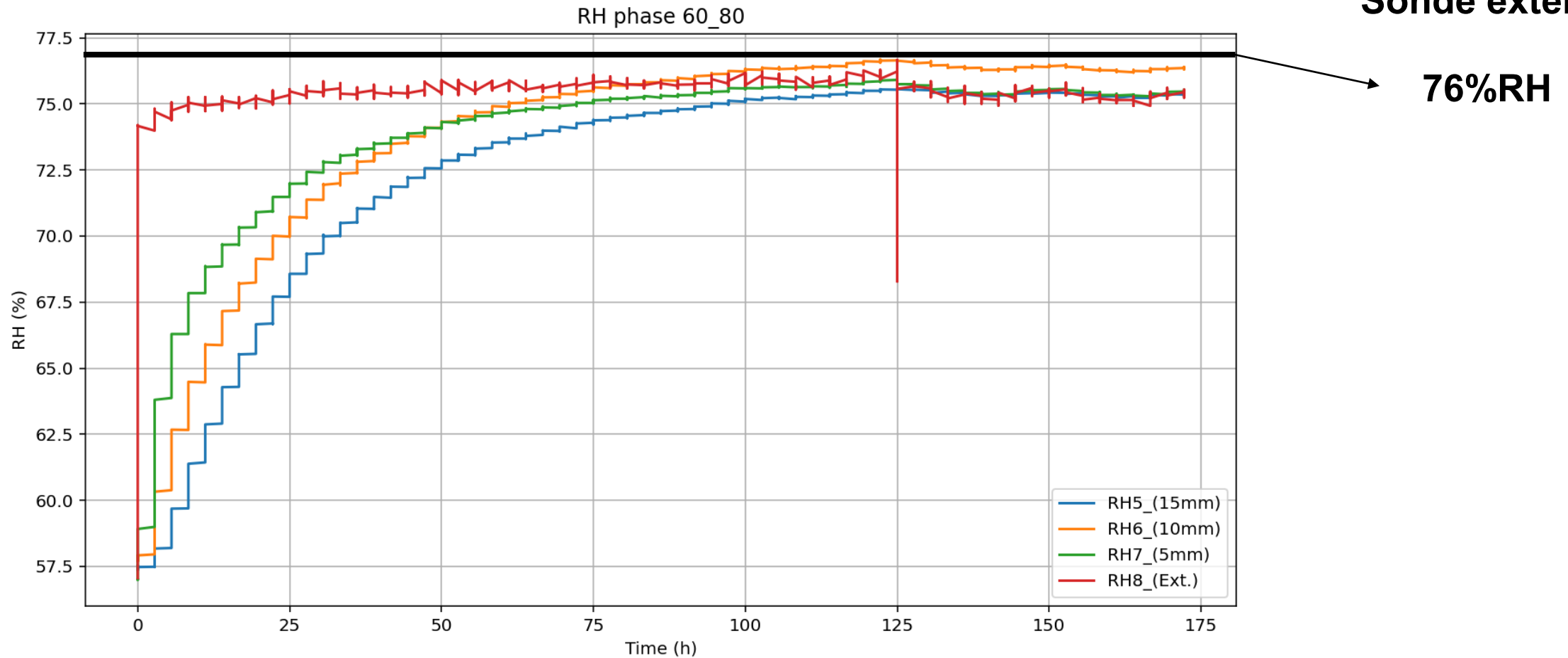


Méthode de mesure via des capteurs de température et d'humidité intégrés

Absorption 60% - 80%RH

20°C

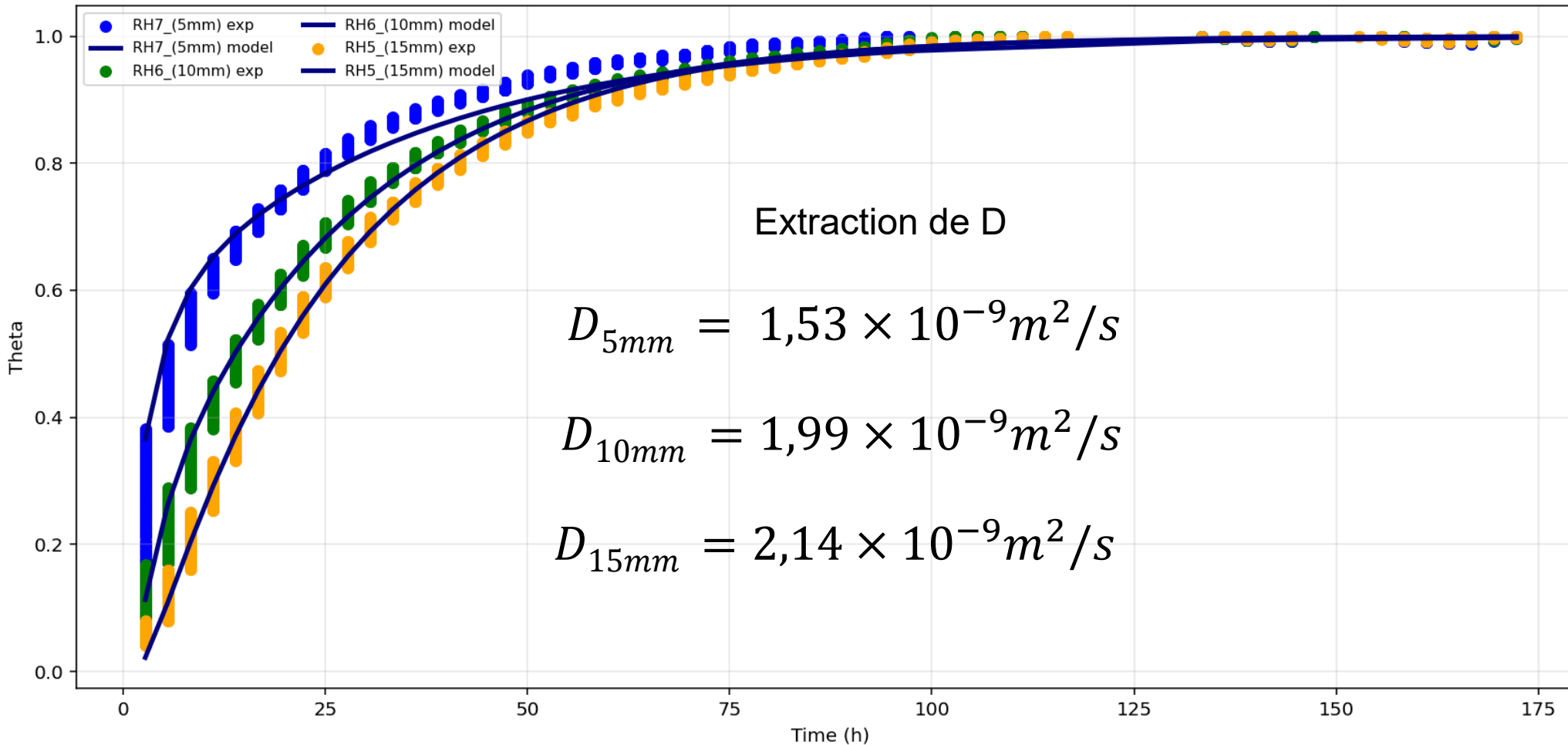
Sonde externe





Méthode de mesure via des capteurs de température et d'humidité intégrés

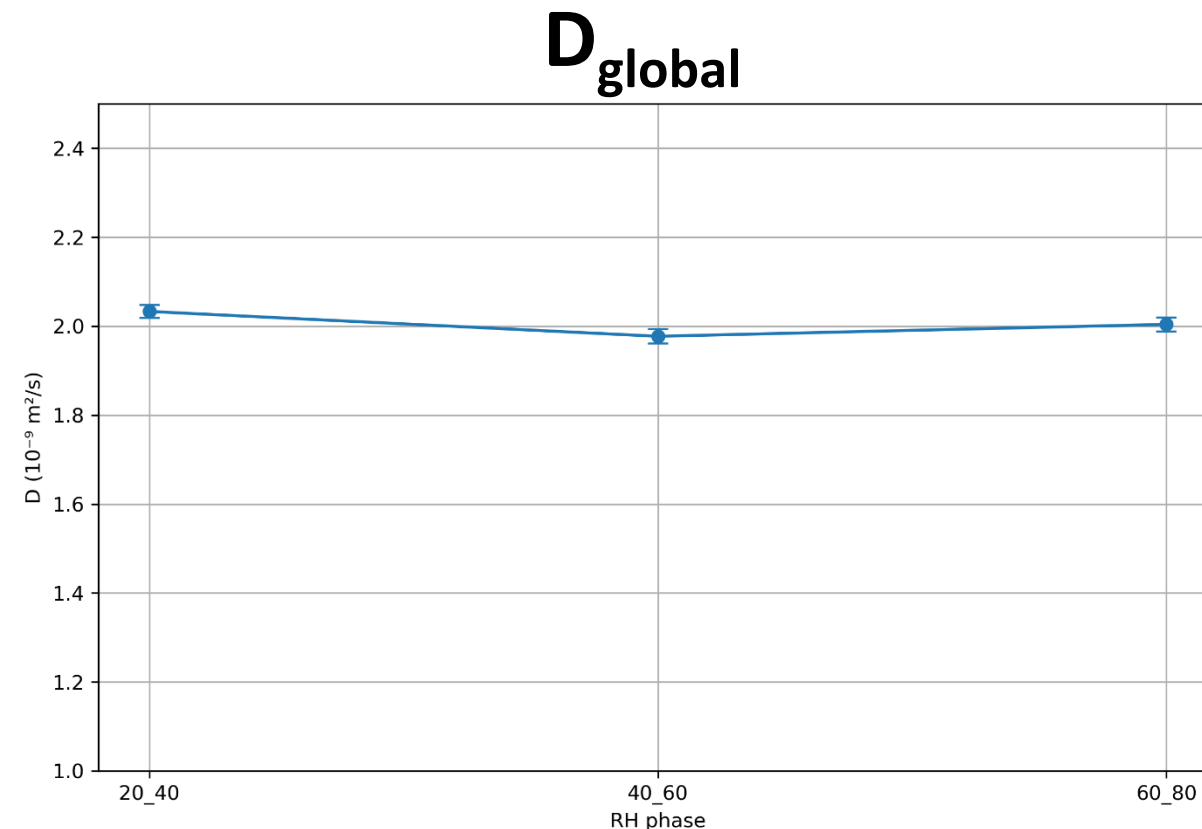
Absorption 60% - 80%RH





Méthode de mesure via des capteurs de température et d'humidité intégrés

| X(mm) | D(m ² /s)x10 ⁻⁹ | | |
|---------------------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------|
| | 20%_40% | 40%_60% | 60%_80% |
| 5 | 1,71 ± 0,037 | 1,53 ± 0,026 | 1,53 ± 0,047 |
| 10 | 2,02 ± 0,016 | 1,95 ± 0,020 | 1,99 ± 0,014 |
| 15 | 2,20 ± 0,009 | 2,13 ± 0,019 | 2,14 ± 0,010 |
| D_{global} | 2,03 ± 0,015 | 1,98 ± 0,016 | 2,00 ± 0,016 |



D est a priori indépendant de la profondeur des capteurs ainsi que du taux d'humidité



Méthode de mesure via des capteurs de température et d'humidité intégrés

Ce travail

20°C

Littérature

85°C/85%RH

| X(mm) | D(m ² /s)x10 ⁻⁹ | | |
|---------------------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------|
| | 20%_40% | 40%_60% | 60%_80% |
| 5 | 1,71 ± 0,037 | 1,53 ± 0,026 | 1,53 ± 0,047 |
| 10 | 2,02 ± 0,016 | 1,95 ± 0,020 | 1,99 ± 0,014 |
| 15 | 2,20 ± 0,009 | 2,13 ± 0,019 | 2,14 ± 0,010 |
| D_{global} | 2,03 ± 0,015 | 1,98 ± 0,016 | 2,00 ± 0,016 |

[1]

| X(mm) | Temp.(°C) | D(m ² /s) |
|-------|-----------|----------------------|
| 10 | 89,4 | 1,87E-09 |
| 20 | 88,7 | 1,99E-09 |
| 30 | 88,1 | 1,74E-09 |

[3]
Numérique:
5,8.10⁻⁹ [m²/s]

[2]

| Samples | A_1 | A_2 | B_1 | B_2 |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|
| X(mm) | 40 | 30 | 40 | 30 |
| D(m ² /s) | 1,15E-09 | 1,02E-09 | 1,52E-09 | 2,29E-09 |

[1]: Kaixuan Li et al : Degradation behaviors of silicone gel encapsulation material with moisture intrusion

[2]: K. Zhang et al : Study of moisture transport in silicone gel for IGBT modules

[3]: Umemoto et al. - 2024 - Moisture Absorption Analysis in Silicone Gel for Power Modules: Experiments and Modeling



I. Le projet SiCRET+

II. Module électronique de puissance

III. Etat de l'art

- **Effets de l'humidité sur les modules électronique de puissances**
- **Absorption de l'humidité par le gel silicone**

IV. Résultats expérimentaux sur le comportement hygroscopique du gel silicone:

- **Par la méthode de mesure gravimétrique**
- **Par la méthode de mesure via des capteurs de température et d'humidité intégrés**

V. Conclusion & Perspectives



Conclusion

- Le gel perd de la masse lors de l'absorption d'humidité, rendant l'estimation du coefficient de diffusion D difficile par méthode gravimétrique.
- La méthode par capteurs d'humidité incorporés permet d'estimer le coefficient de diffusion D de l'humidité dans le silicone.
- Les résultats montrent que le coefficient de diffusion D ne dépendrait ni de l'épaisseur (profondeur des capteurs), ni du taux d'humidité.

Perspectives

- Développer une approche expérimentale permettant la détermination du coefficient de diffusion D du gel de silicone à l'aide de la méthode gravimétrique.
- Poursuivre les campagnes de mesures avec les capteurs afin de caractériser l'évolution du coefficient de diffusion D en fonction de la température.
- Modélisation: Etudier la distribution du champ électrique au niveau des terminaisons de bord des puces en SiC

NRTW 2026

National Reliability Technology Workshop

Mercredi 1^{er} & jeudi 2 avril 2026 | Grenoble

Merci pour votre attention !



Organisé par :



Financé par :



Evolution de la conductivité DC du gel silicone avec la température et l'humidité relative

